

コールドスプレー法によるガスタービン高温部材の 損傷補修とその耐久性評価に関する研究

著者	仁木 隆裕
号	53
学位授与番号	4069
URL	http://hdl.handle.net/10097/42483

氏 名	に き たか ひろ
授 与 学 位	仁 木 隆 裕
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成21年3月25日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科(博士課程)機械システムデザイン工学専攻
指 導 教 員	コールドスプレー法によるガスタービン高温部材の損傷補修と その耐久性評価に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学准教授 小川 和洋
	査読 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 西山 秀哉
	査読 東北大学教授 横堀 壽光 東北大学教授 野中 勇
	査読 東北大学准教授 小川 和洋

論文内容要旨

火力発電ガスタービン用動・静翼等の部材である多結晶 Ni 基超合金においては、長期の使用に伴う経年劣化により損傷が生じた場合、溶接補修により再利用されるケースが認められる。しかし、この場合、溶接熱影響部の存在による組織・強度の不均一性、溶接割れの懸念、長時間に渡る施工、および特殊技能の必要性等多くの問題が指摘されている。これらの問題を解決可能な新しい補修技術として、補修部に熱影響部や相変態が生じない固相接合プロセスであるコールドスプレー(CS)法の応用が期待されている。しかし、補修部に対する安全で安心な維持運用には、スプレー条件の最適化に伴う高い付着強度とそれを保証するための健全性・信頼性評価が不可欠となっている。従来の研究の多くは、コーティングとしての利用が主であり、強度特性よりも付着効率向上に力が注がれていた。そこで本研究においては、無数の粒子が基材へ衝突する際の運動エネルギーおよび反発エネルギーといった粒子エネルギーをモデル化し、付着強度向上のための評価式を提案している。この評価式から得られる粒子エネルギーによって最良なスプレー条件を得、組織健全性、強度信頼性評価により評価式の妥当性を述べている。さらに、これらの長時間使用による長期信頼性評価により CS 付着層の有効性を明らかにしたもので、全編 8 章からなる。以下に各章の概要をまとめる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的、および本論文の構成を述べた。

第 2 章では粒子の付着に関する運動エネルギーと反発エネルギーに着目し、コールドスプレー皮膜の諸特性向上のための評価式(1)を提案した。図 1 は、式(1)による計算結果と、実際にスプレーした付着層の気孔率の相関であり、付着に使用されたエネルギーが高いスプレー条件では、気孔率の低い良好な付着層を形成していることが分かる。この気孔率評価から式(1)の評価式の有効性を検証した。

$$E_{deposit} = \frac{1}{2} * \frac{4}{3} \pi \rho v^2 \left(\sum_{r_i = \frac{D_{th}}{2}}^{\frac{D_{coa}}{2}} \alpha_i r_i^3 - \sum_{r_i = \frac{D_{coa}}{2}}^{\infty} \alpha_i r_i^3 \right) \quad \text{コールドスプレー条件の評価式：(1)}$$

D_{coa} ：はく離開始粗大粒径 D_{th} ：下限界付着粒子 ρ ：粒子の密度 v ：粒子速度

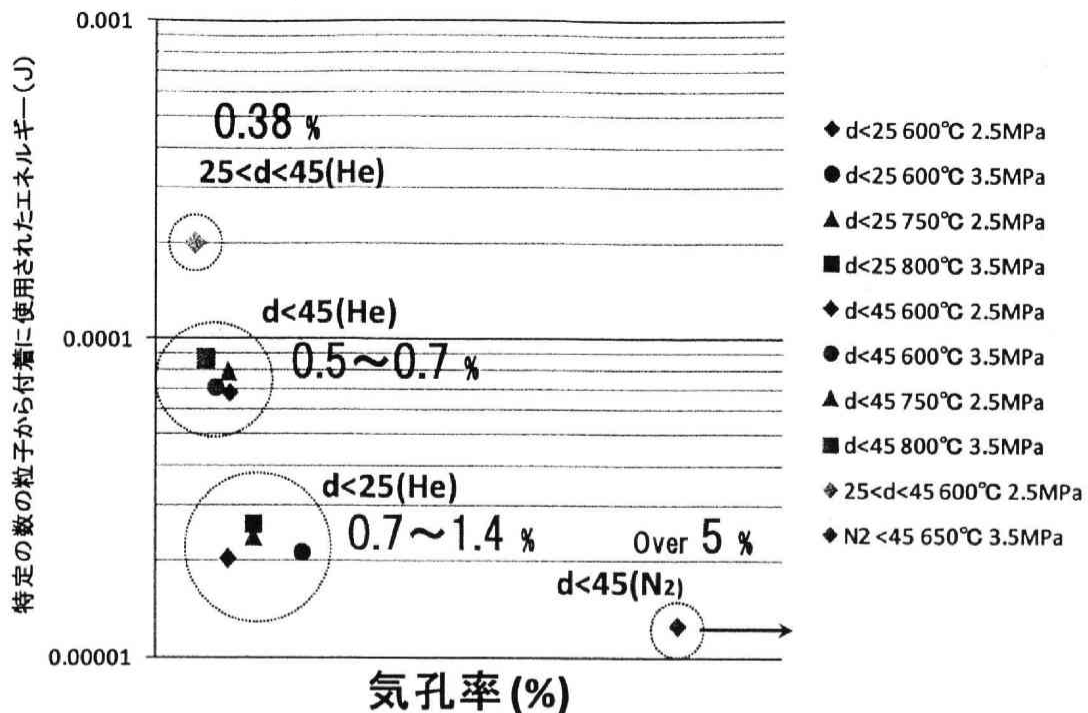


図1 評価式にて計算したエネルギーと気孔率の関係

コールドスプレー付着層は薄いため、それ自体から通常の機械試験サンプルを採取することは困難である。そこで第3章では、前章の評価式により求めた最良条件で施工した補修模擬部位の機械的特性を、小型パンチ (SP) 試験による最大荷重および SP エネルギー値から評価した。これにより前章の評価式の妥当性・有効性が、検証された。

第4章では、補修模擬部位にスプレー後熱処理を施し、付着強度向上の実現とその有効性および強度の定量評価について述べている。図2は熱処理前後の SP エネルギー E_{sp} の比較である。熱処理後の付着層は熱処理前の 30 倍以上の E_{sp} を示しており、付着力の飛躍的向上を確認した。図3は熱処理前後の付着層/基材界面の微細組織の比較である。熱処理前はスプレー時の粒子衝突により基材/付着層界面に残留応力が発生し、粒子が変形しているが、熱処理後はその残留応力が解放され、微視組織が変化している。このことが、強度特性に大きな影響を与えることを明らかにした。

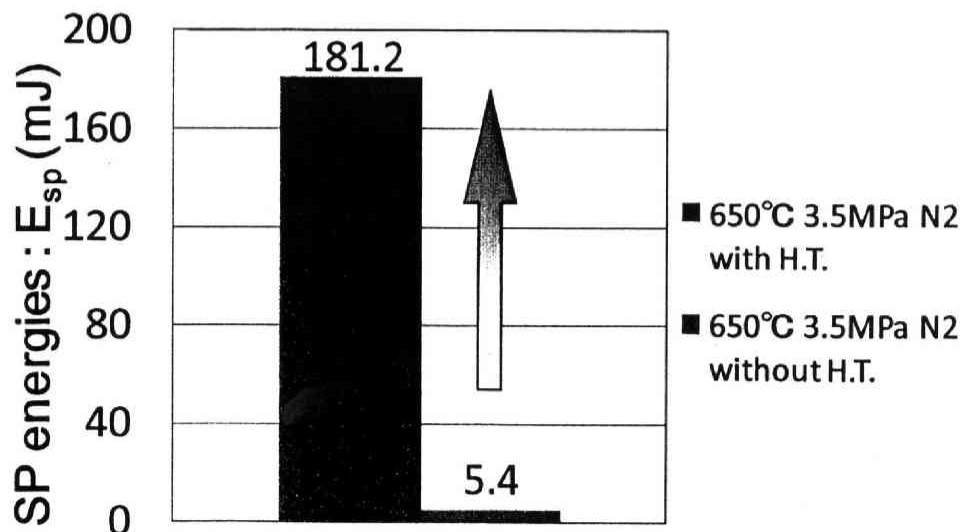


図2 スプレー後熱処理による E_{sp} の増加

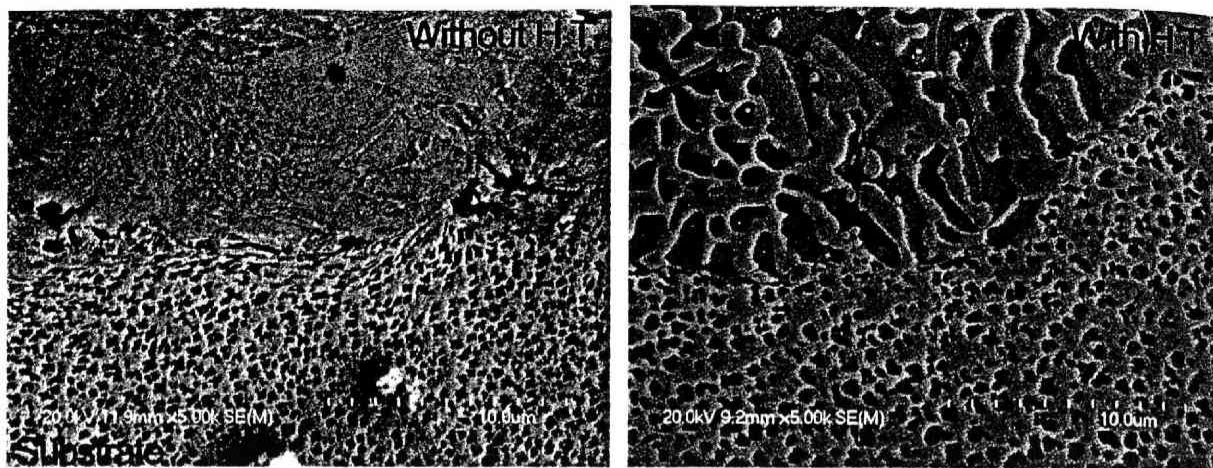


図3 熱処理前後のCS付着層/IN738LC 基材界面の微細組織

第5章では、補修模擬部位を高温暴露試験に供し、付着層と基材部の高温酸化特性を評価した。図4に各時効時間における酸化膜厚さと組織観察結果を示す。付着層の耐高温酸化特性は、同じ化学組成を有する基材部に比べ、顕著に良好であり、900℃、500時間の試験で酸化皮膜厚さが約1/50になることが明らかとなった。これは高い応力の付与による組織変化に伴うものと予測される。

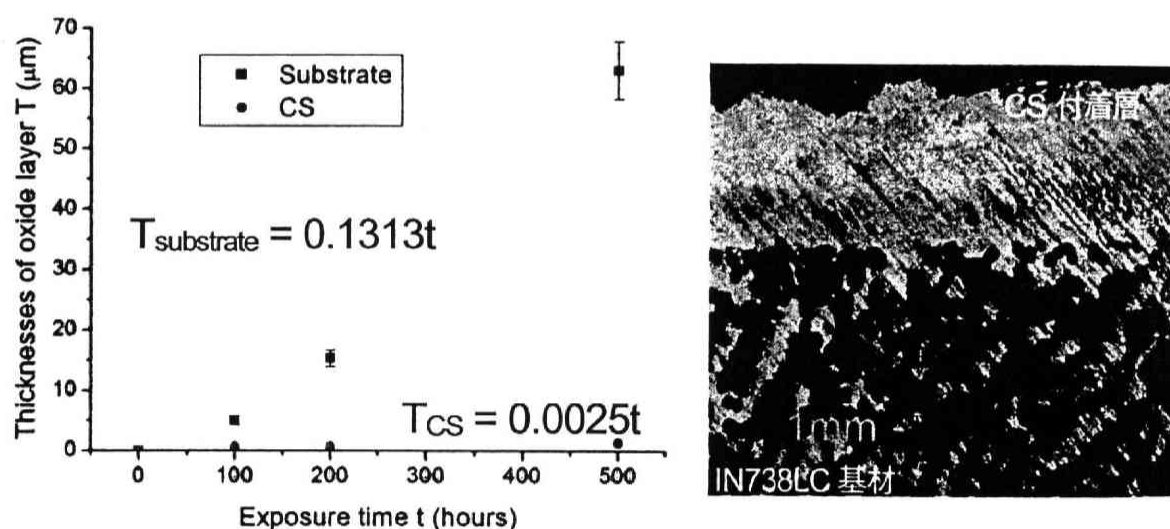


図4 酸化膜厚さの定量評価結果と酸化膜の光学顕微鏡像

第6章では、CS付着層を有する試験片を用い、高温クリープ試験を行い、基材との比較から長期信頼性の検討をした。図5はCS付着層の有無によるクリープ破断時間の比較である。CS付着層を有する材料のクリープ特性は、基材のみの試験片と同等あるいはそれ以上の破断寿命を示した。その強度を持つ理由を検討するため、微視組織観察をした。図6に示す結果から、破面近傍の基材内部にはクリープキャビティが多数存在しており、このキャビティの連結によりき裂が発生し、コールドスプレー付着層に到達していることが見て取れる。またコールドスプレー付着層にてき裂は停留しており、付着層はクリープ強度に対し悪い影響を与えていない。この結果から、第6章では、CS付着層を有する材料は長期使用による信頼性低下が生じにくいことを示した。

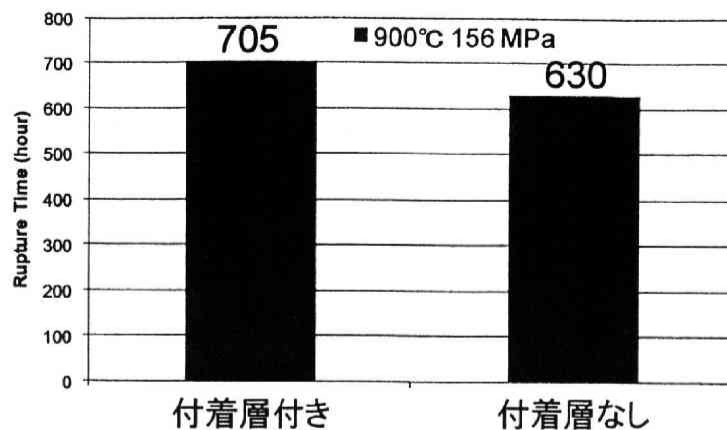


図5 CS付着層の有無によるクリープ破断時間の比較

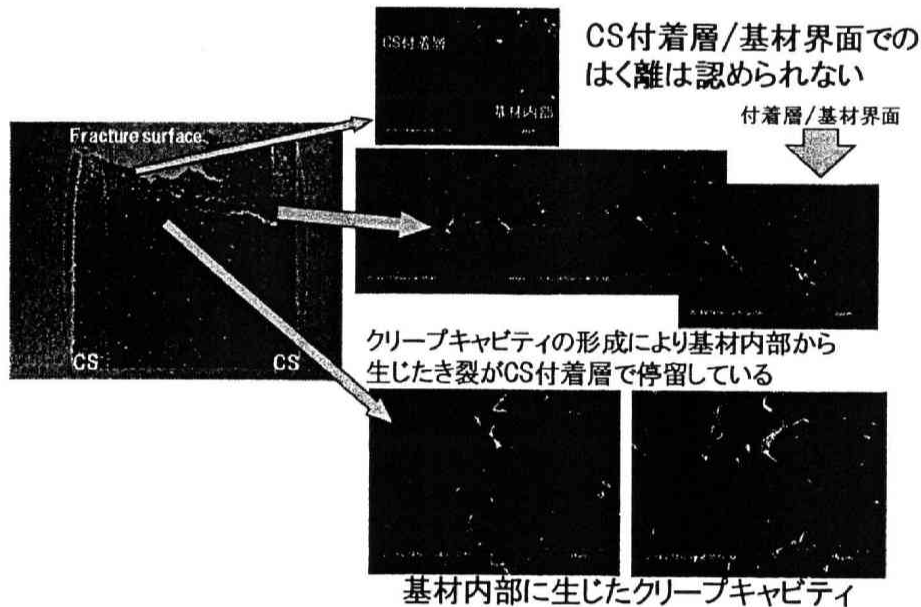


図6 クリープ破面近傍の微細組織評価結果

第7章では、補修以外のアプリケーションとして、遮熱コーティング用ボンドコートの施工に関し、コールドスプレー法の適用可能性を検討した。気孔率、高温酸化特性および残留応力分布の観点から、コールドスプレー法により施工した MCrAlY は良好な特性を示しており、MCrAlY ボンドコーティングの新しい施工方法として適用しうる可能性を示した。第8章は結論である。

最後に各章において得られた知見を総括すると、多結晶 Ni 基超合金 INCONEL738LC のコールドスプレー法による補修には、粒子エネルギーに着目しスプレー条件を選定することが重要であることを理論的に示すことができた。またスプレー後熱処理を施すことで、コールドスプレー付着層の顕著な界面強度向上に成功した。最適化した付着層の長期信頼性も高温酸化特性評価およびクリープ試験の結果から確保されており、実機ガスタービンに適用しうる可能性を示した。さらに、ガスタービン動翼補修後に熱遮蔽コーティングである TBC を施工することを考慮し、TBC のボンドコート材に対するコールドスプレー法適用の可能性についても検討し、コールドスプレー法により施工した MCrAlY は良好な特性を示しており、MCrAlY ボンドコーティングの新しい施工方法として適用しうると判断する。

論文審査結果の要旨

長期の使用に伴い経年劣化したガスタービンプラント用動・静翼等部材である多結晶 Ni 基超合金においては、経年劣化損傷を溶接により補修し再利用される場合が認められる。しかし、溶接熱影響部の存在による組織・強度の不均一性、溶接割れの懸念、長時間に渡る施工および特殊技能の必要性等多くの問題が指摘されている。最近になりこれらの問題に対して解決の可能性が期待される新たな補修技術として、補修部に熱影響部や相変態が生じない固相接合プロセスであるコールドスプレー(CS)法の応用が期待されている。特に、補修部における信頼性の高い維持運用には、多様な因子が関与するスプレー条件の最適化による高い付着強度とそれを検証するための健全性・信頼性評価が不可欠となってきた。従来の CS 法の研究の多くは、コーティングとしての利用を対象としているものが主であり、強度特性よりも付着効率向上に大きな関心が払われてきており、コーティングの強度特性に着目した研究は見られない。

本論文においては、多数の粒子が基材へ衝突する際の運動エネルギーおよび反発エネルギーといった粒子エネルギーをモデル化し、付着強度向上のための新たな評価式を提案している。この評価式から得られる粒子エネルギーから最適なスプレー条件を得、組織健全性、強度信頼性評価により評価式の妥当性を述べている。さらに、これら CS 付着層の長時間使用を模擬した熱負荷後の強度特性による長期信頼性評価により CS 付着層の健全性を明らかにしたもので、全編 8 章からなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的、および本論文の構成を述べている。

第 2 章では、粒子付着に関する新たなモデルを提案し、粒子の運動エネルギー、付着エネルギー、反発エネルギーの考え方を導入し、これらのエネルギーに着目した付着強度向上のためのコールドスプレー条件評価式を提案している。さらに微視組織観察に基づいてモデル及び評価式の有効性を検証している。粒子エネルギーに着目し、コールドスプレー条件評価式を検討した例はこれまでになく、コールドスプレーによる粒子付着に関する基盤を与える提案であり新たな知見である。

第 3 章では、前章の評価式により求めた最適条件で施工した補修模擬部位の機械的特性を、小型パンチ試験による最大荷重およびエネルギー値から評価している。これにより前章の評価式の妥当性・有効性が検証されている。これは提案した評価式が強度特性の向上を与えることを検証しており、重要な知見である。

第 4 章では、補修模擬部位にスプレー後熱処理を施し、付着強度のさらなる向上の実現とその有効性および強度の定量評価について述べている。後熱処理した補修模擬部位界面の微視組織を評価し、その組織形態から強度向上のメカニズムを考察している。スプレー時の粒子衝突により基材/付着層界面に残留応力が発生し、それにより熱処理過程で微視組織が変化し、強度特性に大きな影響を与えることを明らかにしている。CS 付着層の強度特性の向上法を新たに見出したものであり実用化に向けての信頼性の観点から極めて重要な知見である。

第 5 章では、補修模擬部位を高温暴露試験に供し、付着層と基材部の高温酸化特性を評価している。その結果、付着層の耐高温酸化特性は、同じ化学組成を有する基材部に比べ、顕著に良好であることを明らかにしている。これは高い内部応力による固有の組織に起因するものと推察され、コールドスプレー法による補修部の健全性および信頼性をさらに向上させる新たな知見である。

第 6 章では、コールドスプレー付着層を有する試験片を用い、高温クリープ試験を行い、基材との比較からその有効性を示している。補修模擬部のクリープ特性は、基材のみの試験片と同等あるいはそれ以上の破断寿命を示し、高温環境下における長期信頼性の観点およびコールドスプレー法による補修の実用化に向けた重要な知見を得ている。

第 7 章では、新たなアプリケーションとして想定される遮熱コーティング用ボンドコート施工へのコールドスプレー法の適用可能性を検討している。コールドスプレー法にて施工したボンドコートの高温酸化特性を評価し、従来手法である減圧プラズマ溶射によるものと比較、検討している。コールドスプレーによる皮膜は、溶射法によるそれに比べ、極めて良好な耐高温酸化特性を示しており、新たな展開の可能性を強く示すものであり工学上重要な知見である。

第 8 章は結論である。

以上要するに本論文は、コールドスプレー法によるガスタービン高温部材への補修における密着強度の高い付着層を得るために粒子の持つエネルギーに着目し、新たに提案したモデルに基づいた付着層強度の健全性・信頼性を検証したものである。さらに、実機環境を想定した長期信頼性評価によりコールドスプレー付着層の耐酸化性向上を含めた有効性を明らかにしており、機械システムデザイン工学及びエネルギー材料信頼性工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。